

На правах рукописи

ЖАРИКОВА Татьяна Владимировна

НЕТРАДИЦИОННЫЕ ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ АСИНХРОННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2002

Работа выполнена на кафедре электрических машин и аппаратов Томского политехнического университета.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Муравлев О.П.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Селяев А.Н.
кандидат технических наук
Конарев О.С.

Ведущее предприятие: ГНУ НИИ АЭМ при ТУСУР (г. Томск)

Защита диссертации состоится 18 декабря в 15 часов на заседании диссертационного совета К212.269.03 в актовом зале Томского политехнического университета (634034, г. Томск, пр. Ленина, 30, ТПУ).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ТПУ.

Автореферат диссертации разослан « » ноября 2002г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент _____ А.Е. Алехин

Актуальность темы. Повышение качества, конкурентоспособности и экономичности - основные задачи модернизации электротехнической продукции, требующие постоянного внимания и решения. Качество является определяющим фактором конкурентоспособности товаров, конкуренция – важный фактор рыночной экономики, экономическое благополучие предприятий определяется высоким качеством выпускаемой продукции. Эти задачи особенно важны для асинхронных двигателей, которые являются основными преобразователями электрической энергии в механическую.

Асинхронные двигатели новых серий - весьма совершенные электрические машины, соответствующие уровню мирового электромашиностроения. Из мировой практики известно, что массовые серии асинхронных двигателей меняются каждые 5-7 лет, поэтому работа по усовершенствованию конструкции и технологии изготовления в нашей электропромышленности должна идти непрерывно. В настоящее время основные тенденции модернизации при проектировании и изготовлении асинхронных двигателей - это учет точности, исследование влияния рассеивания на показатели качества, нетрадиционные пути снижения массы и габаритных размеров машины, усовершенствование технологических процессов и производственной базы на новых технологических принципах.

Модернизацию асинхронных двигателей целесообразно проводить с использованием системы автоматизированного проектирования. Современные системы автоматизированного проектирования асинхронных двигателей характеризуются несвязанностью между собой, поэтому необходима их координация и объединение в единую систему с общим банком данных. К тому же актуальным для системы автоматизированного проектирования является создание алгоритмов модернизации асинхронных двигателей с учетом рассеивания показателей качества и превышения температуры обмотки.

Модернизация асинхронных двигателей с учетом рассеивания и разработка расчетного комплекса для системы автоматизированного проектирования, несомненно, являются актуальными задачами усовершенствования электротехнической продукции, требующими поиска оптимальных решений.

Данные исследования являются частью комплексных работ, проводимых на кафедре электрических машин и аппаратов Томского политехнического университета по совершенствованию асинхронных двигателей при проектировании и изготовлении. Диссертационная работа выполнена по индивидуальному гранту Томского политехнического университета молодым ученым на проведение научных исследований. В 2002 году Жарикова Т.В. удостоена именной стипендии Нефтяной Компании «ЮКОС» за успехи в научных исследованиях и подготовке молодых специалистов.

Автор считает своим долгом выразить искреннюю признательность научному консультанту – к.т.н., доценту Муравлевой Ольге Олеговне за помощь при подготовке и написании диссертационной работы.

Цель работы - поиск нетрадиционных путей модернизации асинхронных двигателей средней мощности и разработка расчетных алгоритмов для системы

автоматизированного проектирования, заключающихся в использовании основ теории точности для изучения рассеивания показателей качества и среднего превышения температуры обмотки асинхронных двигателей, снижения материалоемкости и использования одного штампа для разных высот осей вращения.

Для реализации поставленной цели определены следующие **задачи исследования**:

- синтезировать математическую модель как программный комплекс системы автоматизированного проектирования для проведения анализа технологического рассеивания, решения задач синтеза допусков и управления качеством на всех стадиях разработки, модернизации, изготовления и эксплуатации асинхронных двигателей;
- рассмотреть возможность использования нетрадиционного пути снижения материалоемкости за счет уменьшения рассеивания показателей качества для модернизации асинхронных двигателей средней мощности;
- создать подсистему автоматизированного проектирования асинхронных двигателей для осуществления унификации сердечников статора для разных габаритов асинхронных двигателей;
- исследовать рассеивание конструктивно-технологических факторов и показателей качества в процессе модернизации асинхронных двигателей;
- провести оценку экономической эффективности предложенных нетрадиционных методов модернизации асинхронных двигателей средней мощности.

Методы исследований. При решении поставленной задачи использовались теория электрических машин, теория точности, теория оптимизации, теория вероятностей и математической статистики, теория квалиметрии, методы математического имитационного моделирования, системного анализа, оценка достоверности результатов вычислительных экспериментов и сравнение их с экспериментальными данными ОАО «Сибэлектромотор» (г. Томск). Для получения практических результатов разработан пакет программ на персональных ЭВМ, по которым проводились расчеты и исследования.

Научная новизна. В работе содержатся следующие новые научные результаты:

1. Синтезирована математическая модель рассеивания показателей качества и среднего превышения температуры обмотки асинхронных двигателей, предназначенная для решения целого комплекса прикладных задач, связанных с учетом точности, рассеивания и обеспечением качества при модернизации процессов проектирования и изготовления асинхронных двигателей.
2. Впервые предложено использование нетрадиционного пути снижения материалоемкости за счет уменьшения рассеивания показателей качества для асинхронных двигателей средней мощности с учетом проведенной оценки экономической эффективности.

3. Получены зависимости изменения материалоемкости асинхронных двигателей от высоты оси вращения, полезной мощности, которые позволяют количественно оценить возможное снижение материалоемкости для асинхронных двигателей разных габаритов.
4. Предложена математическая модель унификации сердечника статора для разных габаритов асинхронных двигателей, позволяющая использовать один штамп для изготовления асинхронных двигателей разных высот осей вращения в новых экономических условиях, применительно к использованию ее в системе автоматизированного проектирования асинхронных двигателей.

Указанные результаты выносятся на защиту.

Практическая ценность. Проведенные исследования позволили разработать комплексы расчетных алгоритмов для системы автоматизированного проектирования асинхронных двигателей и рекомендации по проведению модернизации асинхронных двигателей при проектировании и изготовлении, направленные на повышение качества, конкурентоспособности и экономичности асинхронных двигателей. Это состоит в следующем:

1. На данном этапе развития электротехнической промышленности стало своевременным использование основ теории точности электрических машин, технологических запасов, изученных причин рассеивания конструктивно-технологических параметров при поиске и разработке нетрадиционных путей модернизации современных асинхронных двигателей средней мощности.
2. На базе математической модели рассеивания показателей качества и среднего превышения температуры обмотки асинхронных двигателей разработан программный комплекс системы автоматизированного проектирования для проведения анализа технологического рассеивания, решения задач синтеза допусков и управления качеством на всех стадиях разработки, модернизации, изготовления и эксплуатации асинхронных двигателей.
3. Разработанная математическая модель оценки влияния технологических погрешностей на массогабаритные показатели асинхронных двигателей впервые применена для асинхронных двигателей серии АИР средней мощности. При полном отсутствии рассеивания возможная экономия материалоемкости достигла бы для стали - 15%, для меди - 5.5%, для алюминия - 10%. Так как всегда есть рассеивание показателей качества предельные значения снижения масс стали, меди, алюминия достигнуты быть не могут, но при уменьшении рассеивания в два раза по сравнению с существующим, что реально допустимо, снижение масс стали составит $(10 \div 12)\%$, меди - $(3 \div 5)\%$, алюминия - $(7 \div 9)\%$.
4. Разработка новых подсистем расчета для системы автоматизированного проектирования асинхронных двигателей, в частности, математической модели унификации сердечника статора для разных габаритов асинхронных двигателей, необходима для создания новых унифицированных серий и

параметрических рядов асинхронных двигателей общепромышленного назначения с учетом новейших достижений в области конструкций, технологических процессов изготовления машин и экономического состояния электротехнической промышленности.

Реализация результатов работы. На основе математических моделей, алгоритмов, инженерных методик, предложенных рекомендаций, рассмотренных в диссертации, разработан комплекс программ для системы автоматизированного проектирования, который используется при проектировании и изготовлении асинхронных двигателей. Рассмотренные вопросы разработки математических моделей, связывающих технологические погрешности с погрешностями показателей качества асинхронных двигателей, проведенные исследования точности технологических процессов изготовления асинхронных двигателей, учет точностных вопросов при разработке нетрадиционного пути снижения материалоемкости асинхронных двигателей могут быть использованы при изготовлении и других типов электрических машин. Результаты работы переданы в ОАО СКБ «Сибэлектромотор» (г. Томск). На основании проведенных исследований были усовершенствованы методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Качество и надежность электрических машин» - «Статистическое моделирование законов распределения показателей качества асинхронных двигателей методом Монте-Карло» для студентов, обучающихся по специальности 180100 – электромеханика.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на:

- 4-ой, 5-ой, 6-ой, 7-ой, 8-ой международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ» (Томск, ТПУ, 1998-2002 г.);
- 6-ой всероссийской научно-практической конференции «Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика» (Красноярск, ГАЦМиЗ, 2000 г.);
- 4-ой всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов «Решетневские чтения» (Красноярск, САА, 2000 г.);
- международной научно-технической конференции «Электрические преобразователи энергии» (Томск, ТПУ, 2001 г.).

В том числе были сделаны два доклада на английском языке. Научные работы по материалам и результатам диссертационных исследований, представленные на областных, всероссийских и международных конференциях и конкурсах научно-исследовательских работ, неоднократно отмечены дипломами разных степеней и грамотой.

Публикации. Общее количество публикаций по теме диссертации – 15, из них: 4 статьи депонированы в ВИНТИ, 10 опубликовано в трудах и сборниках конференций, 1 тезисы докладов.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из шести разделов (включая введение и заключение), содержит 214 страниц

машинописного текста, 43 рисунка, 48 таблиц, список литературы из 145 наименований и 8 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность задач модернизации для асинхронных двигателей средней мощности, определена цель работы, сформулированы научная новизна и практическая ценность диссертации, описаны основные полученные результаты их реализация и апробация.

Во втором разделе проведен обзор основ теории точности электрических машин (ЭМ) и анализ возможностей использовать технологические запасы по точности для поиска нетрадиционных путей модернизации асинхронных двигателей (АД) средней мощности.

В существующих рекомендациях по совершенствованию систем и методов управления качеством наблюдается дисбаланс в сторону организационных мер. А при поиске эффективных путей модернизации более важной стороной являются технические меры, позволяющие получить изделия высокого качества. Тогда качество определяется выполнением требований к точности изготовления деталей по размерам и их геометрической форме, к точности сборки изделия, правильному выбору метода контроля и измерительных средств, обеспечивающих заданную точность обработки и сборки.

В соответствии с этой концепцией категориями точности являются такие характеристики точности, как допуск и поле рассеивания. Допуск это технические требования на изготовление детали, а поле рассеивания характеризует возможности выбранного технологического процесса. В этом случае создается дополнительный ресурс точности, обеспечивающий более длительное сохранение заданной точности изделия в процессе его эксплуатации и повышающий его долговечность. Именно здесь открываются возможности для проведения модернизации нетрадиционными методами за счет использования технологического запаса точности в целях создания новых, усовершенствованных АД.

Для обеспечения необходимого уровня качества усовершенствованного АД определяющими становятся технологические факторы, показатели качества (ПК) и допуски на них. В качестве технологических факторов рассматриваются геометрические размеры деталей и элементов и требования к ним по точности изготовления. Для АД показателями качества, рассматриваемыми в диссертационной работе, являются: η - коэффициент полезного действия, $\cos\varphi$ - коэффициент мощности, K_p - кратность пускового вращающего момента, K_m - кратность максимального вращающего момента, K_i - кратность пускового тока, s - скольжение при номинальной нагрузке. Определение среднего превышения температуры обмотки (θ) является важным фактором с целью проверки выполнения требований по допустимому уровню нагрева АД.

Принято допущение, что все показатели качества и конструктивно-технологические факторы являются случайными величинами, подчиняющимися нормальному закону распределения.

Наличие односторонних допусков на показатели качества АД – особенность ЭМ по сравнению с другой машиностроительной продукцией. Начальный пусковой ток, скольжение при номинальной нагрузке и среднее превышение температуры обмотки имеют односторонние допуски с верхней границей, а начальный пусковой и максимальный моменты, коэффициент полезного действия и коэффициент мощности имеют односторонние допуски с нижней границей. Двусторонние допуски назначаются на технологические факторы. Примеры графического изображения двусторонних и односторонних полей рассеивания и допусков при нормальном распределении погрешностей представлены на рис.1.

Основными характеристиками допусков ПК являются номинальное значение параметра x_n и поле допуска t , а технологические погрешности определяются средним значением \bar{x} и полем рассеивания ℓ . От взаимного расположения этих четырех параметров зависит доля выхода значений параметра за поле допусков и истинное количество забракованных АД. Вероятность выхода ПК за пределы допуска является одной из основных характеристик, связанных с рассеиванием ПК. Для количественного определения вероятности выхода значения параметра за пределы допуска необходимо вычислить интеграл вероятностей $\Phi(x)$:

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{xi}^{xs} e^{-t^2} dt \quad (1)$$

Наличие односторонних допусков на показатели качества АД расширяет возможности для усовершенствования АД при назначении номинальных значений ПК и выборе соотношения между средними и номинальными значениями, допусками и полями рассеивания. Это дает возможность учета точности, учета влияния технологических погрешностей на корректировку теоретических результатов и определение оптимальных условий для проведения модернизации АД новыми способами. Актуальность учета точности при модернизации АД возрастает в связи с необходимостью использования разработок в этой области в системе автоматизированного проектирования (САПР), так как именно она открывает большие возможности при усовершенствовании, проектировании, и производстве АД.

Определены задачи исследований.

В третьем разделе представлен анализ и выбор аппарата математической статистики, видов имитационного, стохастического и математического моделирования с учетом их использования в САПР асинхронных двигателей. Разработаны алгоритмы реализации метода Монте-Карло и графического представления результатов, обеспечивающие вычисление основных статистических характеристик и моделирование распределения случайных величин по нормальному закону. Синтезирована математическая модель (ММ) рассеивания показателей качества и среднего превышения температуры обмотки асинхронных двигателей и разработан комплекс программ для ее реализации. Приведены результаты апробации ММ, рекомендации по ее использованию в САПР, анализ моделирования

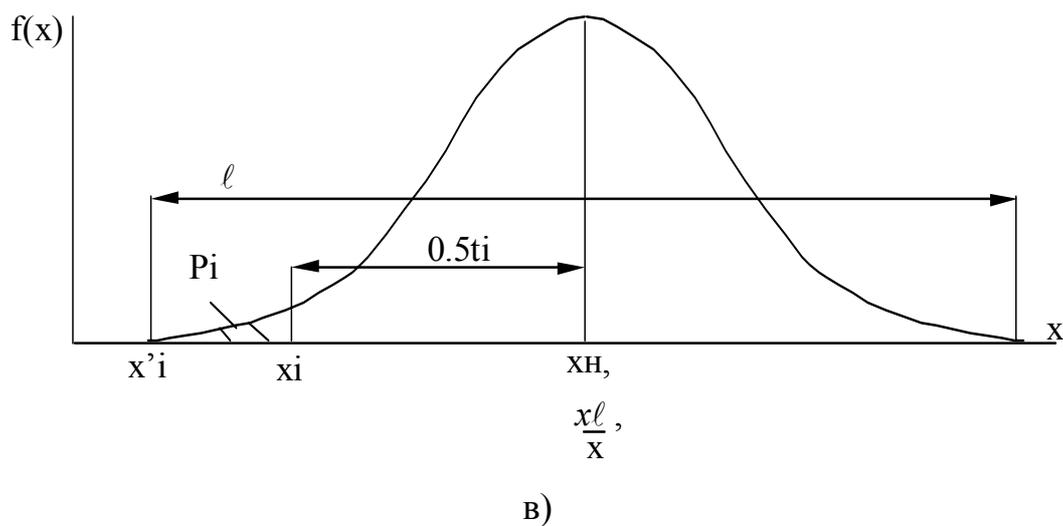
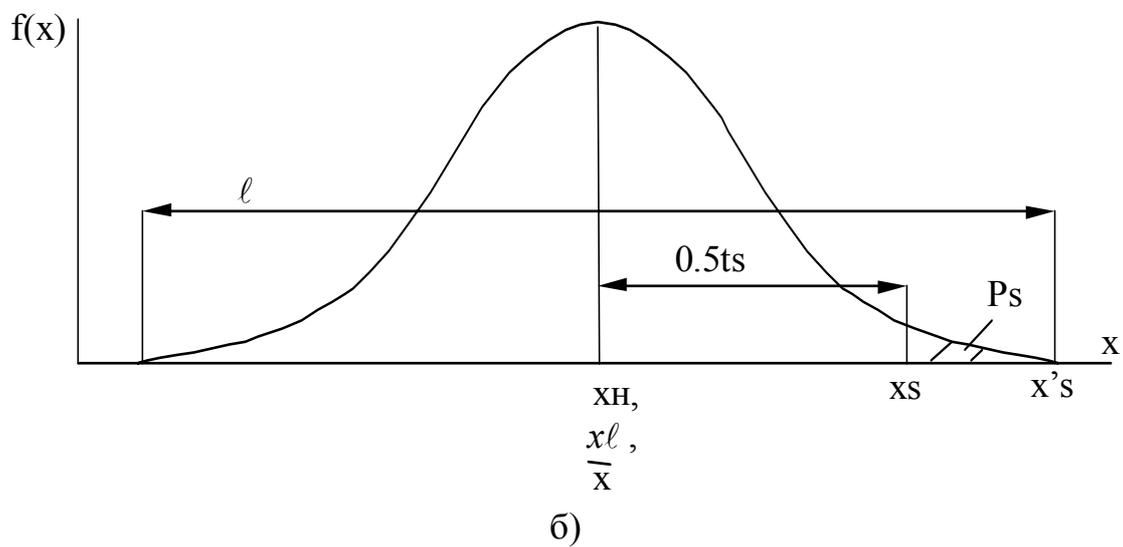
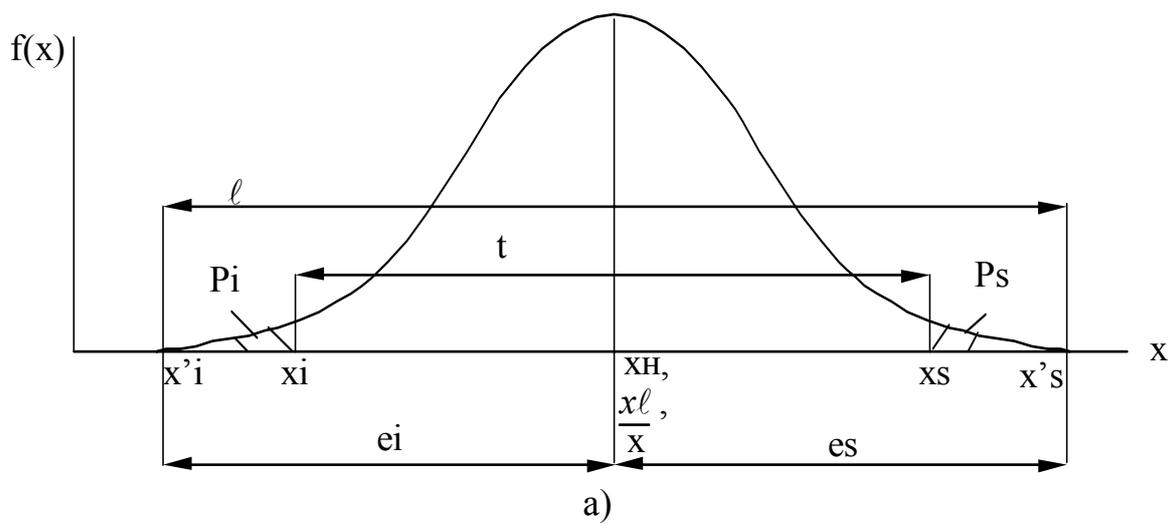


Рис.1. Поля рассеивания и допусков при нормальном распределении погрешностей: а) двусторонний допуск; б) односторонний допуск с верхней границей; в) односторонний допуск с нижней границей

рассеивания, гистограмм, законов распределения показателей качества и среднего превышения обмотки статора.

Задача моделирования рассеивания показателей качества АД состоит в том чтобы, руководствуясь заданными геометрическими размерами и электромеханическими параметрами определить зависимости ПК от факторов их определяющих. В общем виде, каждый ПК есть некоторая функция от факторов, характеризующих качество материалов, деталей и сборочных единиц двигателя:

$$Y_i = f_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_m), \quad (2)$$

где Y_i - i -ый единичный показатель качества АД; x_j - j -ый фактор, характеризующий качество материалов или сборочных единиц АД.

Рассеивания ПК и среднего превышения температуры обмотки АД определяются по рассеиванию конструктивно-технологических параметров. На основе проведенного анализа и по коэффициентам влияния рассеивания ПК и среднего превышения температуры обмотки определены три независимых фактора, определяющих основную долю рассеивания ПК и наиболее существенно влияющих на качество единичных ПК. Поэтому для математического моделирования изготовления АД в данном разделе приняты следующие три независимых переменных: $x_1 = \delta$, $x_2 = P_{см}$, $x_3 = \rho_{ал}$.

ММ рассеивания ПК и среднего превышения температуры обмотки АД представлена в виде совокупности взаимосвязанных расчетов - электромагнитного и теплового. Электромагнитный расчет дает возможность оценить влияние технологии изготовления на рассеивание ПК, а включение в ММ теплового расчета позволило определять тепловое состояние машины и среднее превышение температуры обмотки АД. После расчетов по ММ оказываются сформированными массивы ПК и среднего превышения температуры обмотки, содержащие параметры для построения гистограмм и проверки их на нормальность.

Апробация ММ рассеивания ПК и среднего превышения температуры обмотки АД показывает достоверность полученных результатов. Проверочные расчеты проведены для наиболее массово выпускаемых ОАО "Сибэлектромотор" (г. Томск) двигателей серии АИР с различной высотой оси вращения 90, 100, 112, 132 разной полюсностью $2p = 2, 4, 6$. При сравнении расчетных и экспериментальных данных погрешность не превышает 10%, а по многим ПК и среднему превышению температуры и 5%. Это позволило использовать разработанную ММ и созданный на ее основе расчетный комплекс для дальнейшего моделирования и рекомендовать его для включения в САПР АД.

Средние значения и средние квадратические отклонения параметров δ , $P_{см}$, $\rho_{ал}$, служащих входными параметрами ММ рассеивания ПК и среднего превышения температуры обмотки АД, вычислены по результатам типовых испытаний асинхронных двигателей серии АИР, проведенных ОАО СКБ "Сибэлектромотор" (г. Томск).

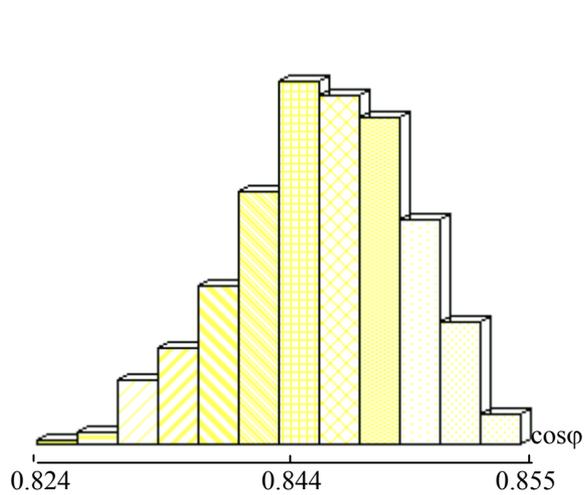
Гистограммы ПК и среднего превышения температуры обмотки АД имеют нормальное распределение (на примере АД АИР112М4 рис.2). Моделирование и анализ соотношения средних и номинальных значений, полей рассеивания и полей допусков ПК и среднего превышения температуры обмотки, показывает в процессе производства наличие запасов для ПК и температуры. Все это дает возможность проводить дальнейшую модернизацию АД при снижении запасов по точности и реализации современных технологий и позволяет повысить точность технологических процессов, что стало возможным в настоящее время, когда АД выпускаются небольшими партиями с учетом особенностей современного технологического оборудования.

В четвертом разделе рассмотрены возможности использования нетрадиционного пути снижения материалоемкости за счет уменьшения рассеивания показателей качества для модернизации асинхронных двигателей средней мощности, который может быть реализован в настоящих условиях рыночной экономики.

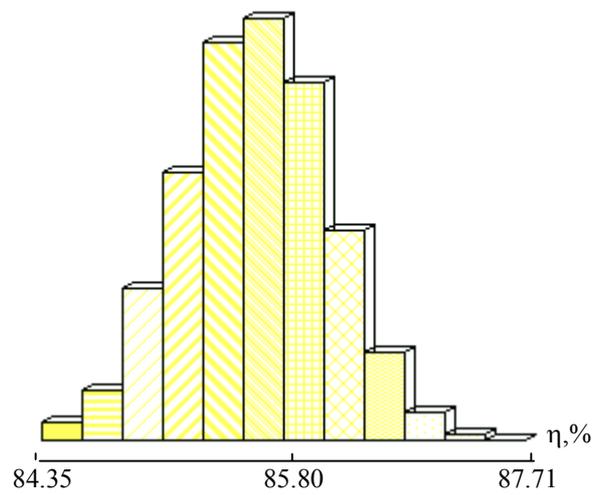
Одним из основных направлений повышения конкурентоспособности электротехнической продукции было и остается снижение материалоемкости. Анализ развития серийного производства показывает, что снижение массогабаритных показателей достигалось в первую очередь за счет повышения электромагнитных нагрузок, но на современном этапе эти возможности практически исчерпаны. Поэтому при поисках нетрадиционных путей модернизации актуально рассмотрение вопроса снижения материалоемкости АД за счет повышения точности изготовления. Логично предположить, что чем меньше рассеивание параметров, тем выше точность изготовления АД. И наоборот, можно повышать точность производства уменьшением полей рассеивания.

Для продолжения работ в этом направлении была усовершенствована ММ оценки влияния технологических погрешностей на массогабаритные показатели асинхронных двигателей и впервые рассмотрено ее применение для асинхронных двигателей разных габаритов. В качестве независимых переменных на первом этапе исследований были выбраны только изменения длины сердечников статора (l_1) и ротора (l_2), так как изменение геометрии поперечного сечения двигателя повлечет за собой изменение штампов для изготовления, потребует больших капитальных затрат на литейное, штамповочное, механообрабатывающее и другое оборудование.

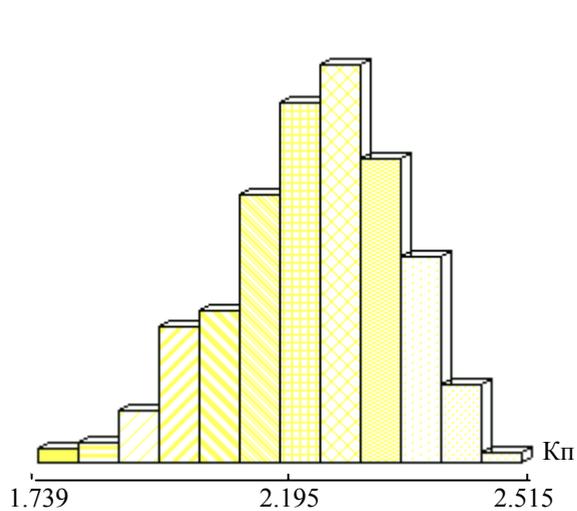
Важнейшими требованиями, с точки зрения снижения материалоемкости современных ЭМ, является экономия материалов: электротехнической стали, меди, алюминия. Все эти характеристики могут рассматриваться в качестве параметра оптимизации при построении ММ оценки влияния технологических погрешностей на массогабаритные показатели АД. Задача поиска оптимального АД заключается в том, чтобы путем вычислений определить такие ПК, при которых целевая функция достигает своего экстремального (минимального) значения. При этом ограничениями для данной ММ служат ПК. Уменьшение длины сердечников необходимо проводить до тех пор, когда не выполняется хотя бы одно из ограничений.



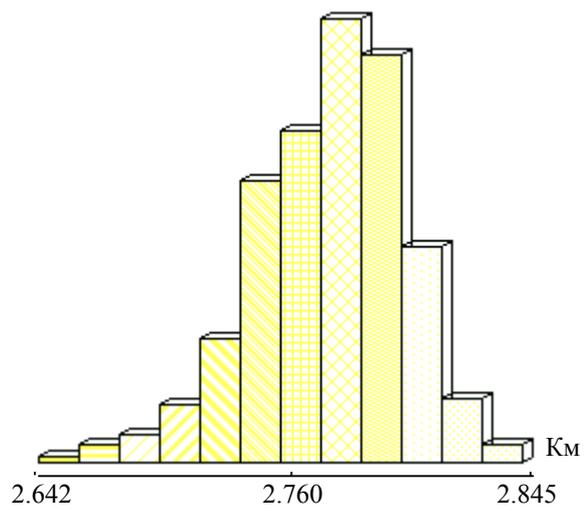
а) Распределение коэффициента мощности



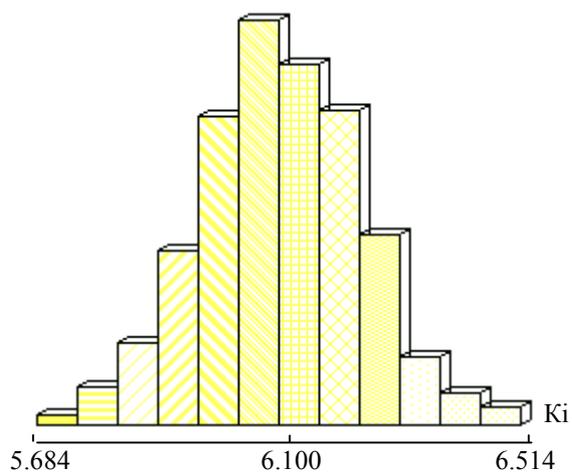
б) Распределение коэффициента полезного действия



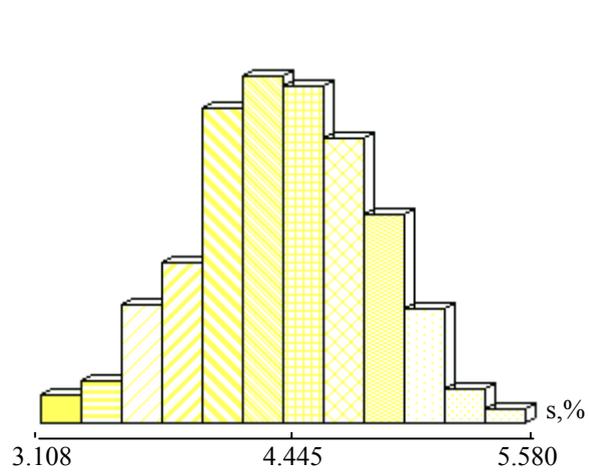
в) Распределение кратности пускового вращающего момента



г) Распределение кратности максимального вращающего момента



д) Распределение кратности пускового тока



е) Распределение скольжения при номинальной нагрузке

Рис.2. Гистограммы распределений показателей качества АД АИР112М4

Количественная оценка влияния технологического рассеивания параметров на материалоемкость АД проведены для выпускаемых двигателей ОАО “Сибэлектромотор” (г. Томск) серии АИР различных габаритов, на диапазон средних мощностей от 1,5 до 7,5 кВт. Анализ результатов расчета показал, что реальным ограничением является $\cos\phi$, так как при минимально допустимом значении η , значение $\cos\phi$ значительно ниже допустимого.

Определение потенциальных возможностей снижения массогабаритных показателей АД производится расчетом снижения материалоемкости (ΔM) и удельной материалоемкости модернизированного АД (G) по каждому виду материалов – стали, меди, алюминия:

$$\Delta M = \frac{M_{\delta} - M_m}{M_{\delta}} 100\%, \quad (3)$$

$$G = \frac{M_m}{P_{2H}}, \quad (4)$$

где M_{δ} – масса базового АД, M_m – масса модернизированного АД.

Получены зависимости изменения материалоемкости и удельной материалоемкости асинхронных двигателей от высоты оси вращения (h), полезной мощности (P_{2H}) для стали, меди (рис.3), алюминия, которые позволяют количественно оценить снижение материалоемкости асинхронных двигателей. Построенные зависимости аппроксимированы и получены уравнения полиномиальных кривых второй и третьей степени, величина достоверности аппроксимации которых равна единице:

- для полиномов $\Delta M=f(h)$:

$$\Delta M_{cm} = 0.0017h^2 - 0.2855h + 16.55, \quad (5)$$

$$\Delta M_m = 0.0016h^2 - 0.305h + 16.464, \quad (6)$$

$$\Delta M_{ал} = 0.0018h^2 - 0.3199h + 17.74; \quad (7)$$

- для полиномов $\Delta M=f(P_{2H})$:

$$\Delta M_{cm} = 0.1563P_{2H}^2 - 0.8062P_{2H} + 5.2578, \quad (8)$$

$$\Delta M_m = 0.1268P_{2H}^2 - 0.7818P_{2H} + 2.9004, \quad (9)$$

$$\Delta M_{ал} = 0.156P_{2H}^2 - 0.8655P_{2H} + 4.3773; \quad (10)$$

- для полиномов $G=f(h)$:

$$G_{cm} = -0.00007h^3 + 0.0268h^2 - 3.2938h + 140.65, \quad (11)$$

$$G_m = -0.00001h^3 + 0.005h^2 - 0.5679h + 21.664, \quad (12)$$

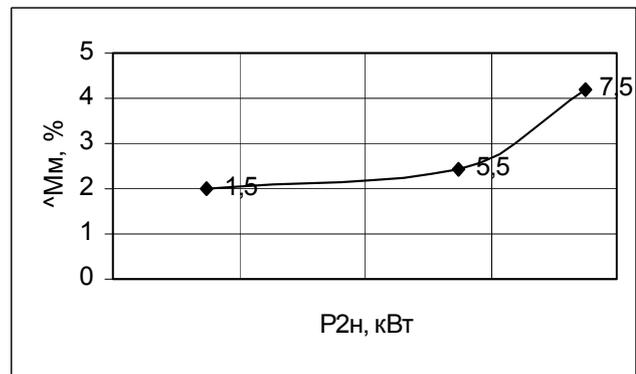
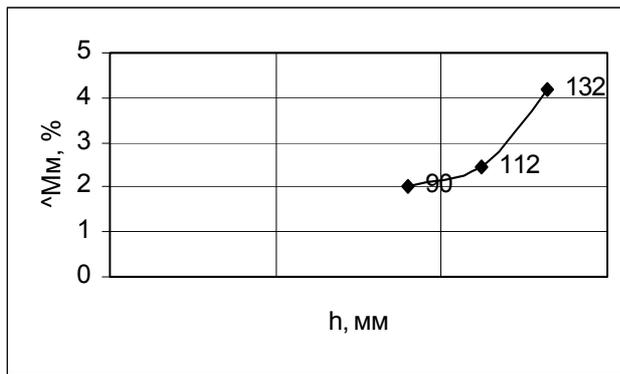
$$G_{ал} = -0.000009h^3 + 0.003h^2 - 0.3427h + 13.399; \quad (13)$$

- для полиномов $G=f(P_{2H})$:

$$G_{cm} = 0.0143P_{2H}^3 - 0.109P_{2H}^2 - 0.4141P_{2H} + 9.298, \quad (14)$$

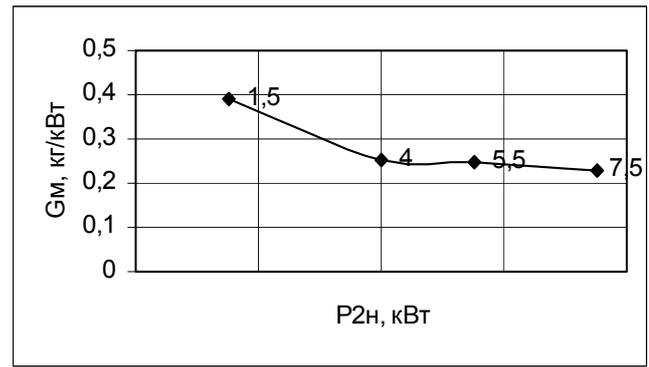
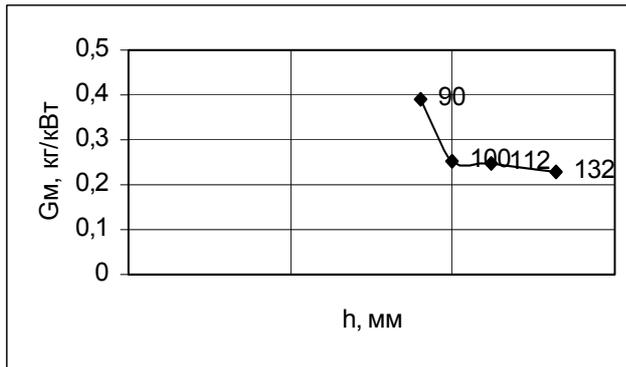
$$G_m = -0.0024P_{2H}^3 + 0.0387P_{2H}^2 - 0.21P_{2H} + 0.6249, \quad (15)$$

$$G_{ал} = -0.0009P_{2H}^3 + 0.0168P_{2H}^2 - 0.1109P_{2H} + 0.5185. \quad (16)$$



а)

б)



в)

г)

Рис.3. Полиномы снижения материалоемкости и удельной материалоемкости в зависимости от высоты оси вращения, полезной мощности для меди

Анализ зависимостей показывает, что для асинхронных двигателей серии АИР всех высот осей вращения имеется возможность снижения материалоемкости.

Предложенная ММ оценки влияния технологических погрешностей на массогабаритные показатели АД является основой нетрадиционного пути снижения материалоемкости - за счет уменьшения рассеивания показателей качества АД. Расчеты по ММ показали, что если бы рассеивание совсем отсутствовало, то для асинхронных двигателей серии АИР рассматриваемого диапазона мощностей, возможная экономия материалоемкости достигла бы для стали - 15%, для меди - 5.5%, для алюминия - 10%. Однако предельные значения снижения масс стали, меди, алюминия практически не могут быть достигнуты, так как всегда есть рассеивание показателей качества. Но если рассеивание уменьшить в 2 раза по сравнению с существующим, что реально допустимо, то в этом случае снижение масс стали составит (10÷12)%, меди - (3÷5)%, алюминия - (7÷9)%. Полученные результаты позволяют оценить возможности при использовании ММ оценки влияния технологических погрешностей на массогабаритные показатели АД в САПР АД для снижения материалоемкости. При изменении поперечного сечения сердечников статора, ротора и оптимизации АД в целом, можно получить еще большее снижение масс стали, меди и алюминия.

Для оценки экономической эффективности произведен расчет приведенных затрат и стоимости затраченных материалов для базового двигателя и при предельно измененной материалоемкости. Расчеты показали, что при снижении материалоемкости снижаются затраты материалов и соответственно их стоимость. Но при уменьшении длин сердечников статора и ротора наблюдается ухудшение коэффициента мощности, а даже незначительное снижение коэффициента мощности приводит к увеличению суммарных приведенных затрат. Поэтому были рассчитаны процент увеличения производственных затрат и процент экономии от снижения стоимости материалов. Анализ расчетных данных показывает, что процент экономии больше процента увеличения АД. Проведенная экономическая оценка нетрадиционного пути снижения материалоемкости наглядно характеризует экономичность и перспективность предлагаемого способа модернизации АД.

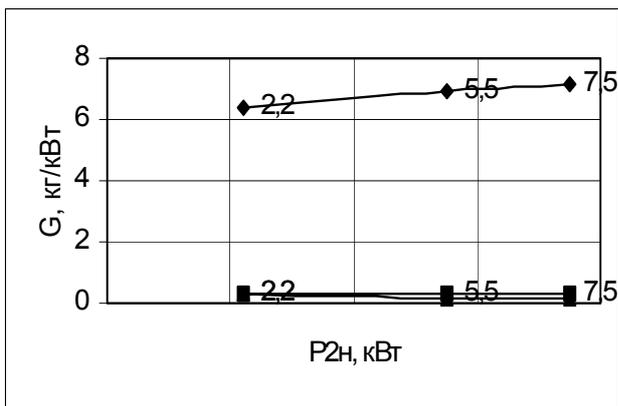
Пятый раздел посвящен созданию комплекса алгоритмов для системы автоматизированного проектирования и разработке математической модели унификации сердечника статора для разных габаритов асинхронных двигателей.

Для разработки новых серий АД в связи с уменьшением серийности актуальным является рассмотрение возможности применения одного наружного диаметра для разных высот осей вращения. В этом случае конструкция для каждой высоты оси вращения будет ориентирована на тот парк оборудования, которым обладает производство, с минимальными затратами на модернизацию.

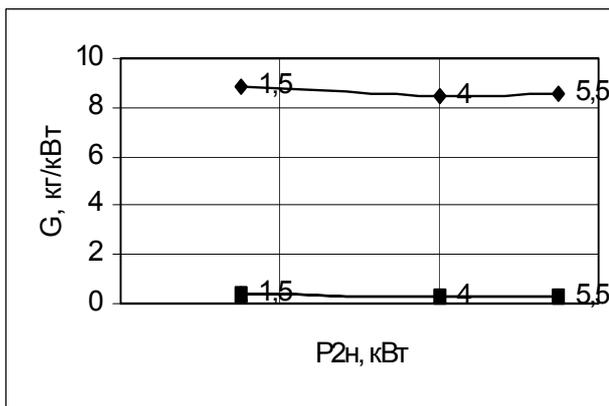
Перестройка процесса проектирования заключается в расчете двигателя без изменения геометрии поперечного сечения, на большую высоту оси вращения с заданной мощностью, за счет изменения длины сердечника статора. Для сохранения геометрии поперечного сечения так же был произведен перерасчет числа витков в фазе обмотки статора (w_1), числа эффективных проводников в пазу статора (u_n) и поперечного сечения провода обмотки статора ($q_{эф}$). Варьирование этих параметров определяется уровнем использования активных материалов асинхронного двигателя, в частности, зависит от электромагнитных нагрузок (A , B_δ), но в большей степени от индукции в воздушном зазоре.

Количественная оценка возможностей использования одного наружного диаметра для разных высот осей вращения на основе ММ унификации сердечника статора для разных габаритов АД проведена для АД серии АИР выпускаемых ОАО “Сибэлектромотор” (г. Томск). Для проведения расчетов по предложенной ММ были выбраны АД полюсностью $2p=2, 4, 6$, с высотой оси вращения $h=90, 100$ и их перерасчет на высоты $h=100, 112$ и $h=112, 132$, соответственно.

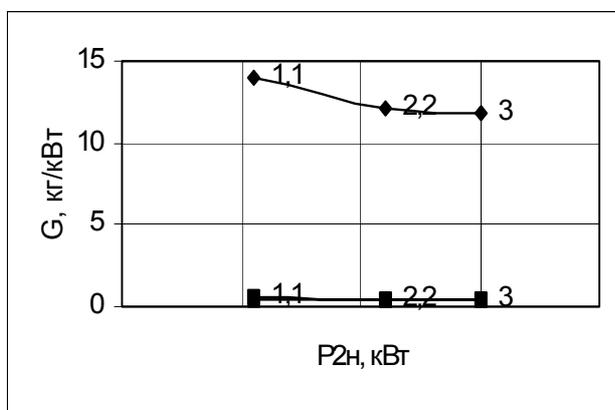
Построены зависимости удельной материалоемкости используемых материалов: \blacklozenge - стали, \blacktriangle - меди, \blacksquare - алюминия от полезной мощности базовых АД и при переходе на большую высоту оси вращения (рис.4). Построенные кривые аппроксимированы и получены уравнения полиномиальных кривых



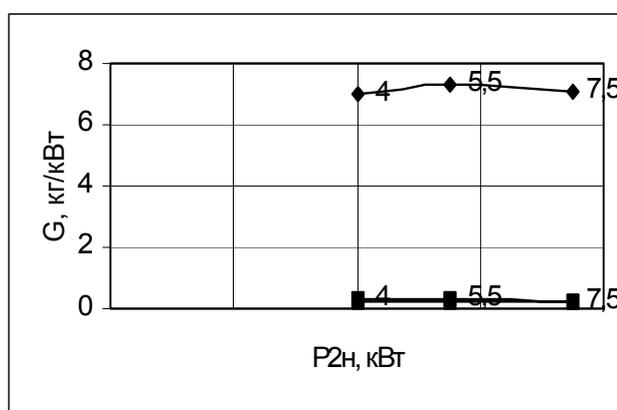
а) АИР90,90-100,90-112, L2



б) АИР90,90-100,90-112, L4



в) АИР90,90-100,90-112, L6



г) АИР100,100-112,100-132, L4

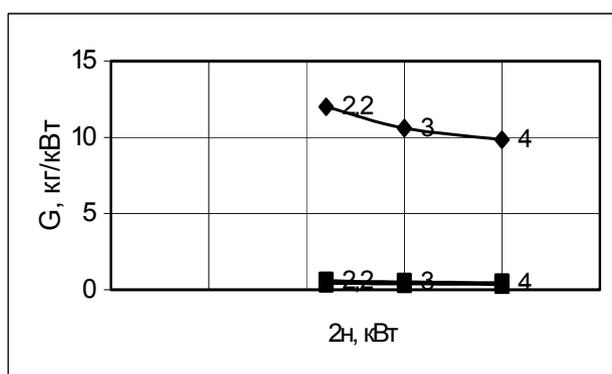


Рис.4. Зависимость удельной материалоемкости от полезной мощности АД при переходе на большую высоту оси вращения

второй степени:

- для АД АИР90, 90-100, 90-112, L2:

$$G_{ст} = -0.0134P_{2н}^2 + 0.2747P_{2н} + 5.8268, \quad (17)$$

$$G_{м} = 0.0089P_{2н}^2 - 0.116P_{2н} + 0.5149, \quad (18)$$

$$G_{ал} = 0.0018P_{2н}^2 - 0.0253P_{2н} + 0.3718; \quad (19)$$

- для АД АИР90, 90-100, 90-112, L4:

$$G_{ст} = 0.0617P_{2н}^2 - 0.5132P_{2н} + 9.501, \quad (20)$$

$$G_{м} = 0.0081P_{2н}^2 - 0.0959P_{2н} + 0.5226, \quad (21)$$

$$G_{ал} = 0.0061P_{2н}^2 - 0.061P_{2н} + 0.4788; \quad (22)$$

- для АД АИР90, 90-100, 90-112, L6:

$$G_{ст} = 0.7039P_{2н}^2 - 3.9965P_{2н} + 17.544, \quad (23)$$

$$G_{м} = -0.0147P_{2н}^2 + 0.044P_{2н} + 0.3994, \quad (24)$$

$$G_{ал} = 0.0398P_{2н}^2 - 0.2331P_{2н} + 0.8233; \quad (25)$$

- для АД АИР100, 100-112, 100-132, L4:

$$G_{ст} = -0.1071P_{2н}^2 + 1.2539P_{2н} + 3.6889, \quad (26)$$

$$G_{м} = -0.004P_{2н}^2 + 0.0391P_{2н} + 0.1643, \quad (27)$$

$$G_{ал} = -0.0019P_{2н}^2 + 0.0136P_{2н} + 0.2673; \quad (28)$$

- для АД АИР100, 100-112, 100-132, L6:

$$G_{ст} = 0.5343P_{2н}^2 - 4.5171P_{2н} + 19.36, \quad (29)$$

$$G_{м} = -0.0235P_{2н}^2 + 0.1083P_{2н} + 0.2813, \quad (30)$$

$$G_{ал} = 0.0311P_{2н}^2 - 0.2718P_{2н} + 1.0453. \quad (31)$$

Достоверность аппроксимации для всех полученных выражений равна единице.

Результаты проведенных экспериментов показали возможность использования одного наружного диаметра сердечника статора как минимум для двух больших высот осей вращения без снижения заданного уровня качества (соблюдаются ограничения по всем ПК и среднему превышению температуры обмотки). Переход на следующие высоты оси вращения возможен при поиске оптимального в этом случае решения, но уже при худших значениях ПК АД. Анализ зависимостей показывает однозначное снижение удельной материалоемкости для стали, меди, алюминия. Количество материалов на единицу мощности с ростом высоты оси вращения имеет тенденцию к уменьшению. Необходимо отметить, что разработанную ММ унификации сердечника статора для разных габаритов АД можно использовать как подсистему САПР АД при расчетном проектировании для разработки многочисленных модификаций двигателей.

Считается целесообразным проводить исследования рассеивания ПК и среднего превышения температуры обмотки уже на этапах модернизации при перерасчете АД на большую высоту оси вращения, чтобы оценить - нет ли

увеличения рассеивания. Располагая представленной ранее ММ рассеивания ПК и среднего превышения температуры обмотки АД и соответствующим программным комплексом, можно определить величины технологического рассеивания ПК и среднего превышения температуры обмотки модернизированных АД и сравнить их с требованиями ГОСТа. Все показатели качества и средние превышения температуры обмоток асинхронных двигателей по результатам вычислительных экспериментов и гистограммам распределений ПК, спроектированных по математической модели унификации сердечника статора для разных габаритов АД, подчиняются нормальному закону распределения, а величина полей рассеивания соизмерима с полями рассеивания базовых асинхронных двигателей. Данные выводы позволяют принять решение о перспективности выбранного пути модернизации АД в этом направлении.

Для оценки перспективности данных разработок с экономической точки зрения можно воспользоваться стандартной экономической методикой ВНИИЭМ. Выполнены расчеты приведенных затрат для спроектированных АД, базовых, и процент их различия. Сравнение АД проводилось по полезной мощности на валу. Анализ результатов таблицы показывает, что возможно как небольшое уменьшение, так и небольшое увеличение приведенных затрат при перерасчете АД на большую высоту оси вращения. Это можно объяснить тем, что модернизация АД осуществляется за счет изменения длины сердечника статора, которое приводит к изменению энергомеханических показателей не всегда в лучшую сторону. Несмотря на то, что все ПК находятся в допустимых пределах, даже небольшое их ухудшение сказывается на результате приведенных затрат. В данном случае считаем целесообразным продолжать исследования в выбранном направлении с целью накопления и проработки материала для поиска и принятия оптимального решения.

В заключении сделаны выводы и приведены основные результаты выполненных исследований. В диссертационной работе поставлены и решены задачи поиска нетрадиционных путей модернизации асинхронных двигателей средней мощности, разработаны расчетные алгоритмы системы автоматизированного проектирования на основе теории точности для изучения рассеивания показателей качества и среднего превышения температуры обмотки, снижения материалоемкости и использования одного штампа для разных высот осей вращения асинхронных двигателей. Основные научные и практические результаты выполненной работы сводятся к следующим положениям:

1. На данном этапе развития электротехнической промышленности стало своевременным использование основ теории точности электрических машин, технологических запасов, изученных причин рассеивания конструктивно-технологических параметров при поиске и разработке нетрадиционных путей модернизации современных асинхронных двигателей средней мощности, отражение этих вопросов в системе автоматизированного проектирования.

2. Синтезирована математическая модель рассеивания показателей качества и среднего превышения температуры обмотки асинхронных двигателей. Математическая модель позволяет оценить влияние технологии изготовления на рассеивание показателей качества и среднего превышения температуры обмотки, дать количественную оценку при изменении технологии. Значения полей рассеивания, полученных по математической модели рассеивания показателей качества и среднего превышения температуры обмотки асинхронных двигателей, соответствуют результатам исследования реальных технологических процессов изготовления асинхронных двигателей. Показатели качества, среднее превышение температуры обмотки асинхронных двигателей являются случайными величинами, подчиняющимся нормальному закону распределения. Моделирование и анализ соотношения средних и номинальных значений, полей рассеивания и полей допусков показателей качества и среднего превышения температуры обмотки, показывает в процессе производства наличие запасов для показателей качества и температуры. Все это дает возможность проводить дальнейшую модернизацию асинхронных двигателей при снижении запасов по точности и реализовать современные технологии. Апробация модели показала, что при сравнении расчетных и экспериментальных данных погрешность не превышает 10%, а по многим показателям качества и 5%. Это позволило использовать разработанную математическую модель и созданный на ее основе расчетный комплекс для дальнейшего моделирования и рекомендовать его для включения в систему автоматизированного проектирования асинхронных двигателей.
3. В основу нетрадиционного пути снижения материалоемкости положено уменьшение рассеивания конструктивно-технологических факторов и показателей качества асинхронных двигателей. Была разработана математическая модель оценки влияния технологических погрешностей на массогабаритные показатели асинхронных двигателей и впервые рассмотрено ее применение для асинхронных двигателей серии АИР на диапазон средней мощности. При полном отсутствии рассеивания возможная экономия материалоемкости достигла бы для стали - 15%, меди - 5.5%, алюминия - 10%. Так как всегда есть рассеивание показателей качества предельные значения снижения масс стали, меди, алюминия достигнуты быть не могут, но при уменьшении рассеивания в два раза по сравнению с существующим, что реально допустимо, снижение масс стали составит $(10 \div 12)\%$, меди - $(3 \div 5)\%$, алюминия – $(7 \div 9)\%$.
4. Получены зависимости изменения материалоемкости асинхронных двигателей от высоты оси вращения, полезной мощности, которые позволяют количественно оценить возможное снижение материалоемкости для асинхронных двигателей разных габаритов.
5. Экономическая оценка нетрадиционного пути снижения материалоемкости асинхронных двигателей показала, что предложенный метод эффективен и может быть реализован на электротехнических предприятиях.

6. Каждый период времени диктует свой подход к определению целесообразности выбора конструктивного решения. Анализ результатов показывает на данном этапе возможность применения одного наружного диаметра, то есть без изменения геометрии поперечного сечения асинхронного двигателя, для разных высот осей вращения практически без снижения заданного уровня качества и при снижении удельной материалоемкости асинхронных двигателей. Увеличение модификаций асинхронных двигателей по мощностям на одной высоте оси вращения можно считать важным моментом в энергосбережении ресурсов. Целесообразно продолжать исследования в выбранном направлении с целью накопления и проработки материала для поиска и принятия оптимального решения.
7. Результаты работы используются в ОАО СКБ «Сибэлектромотор» (г. Томск) и в учебном процессе в курсе «Качество и надежность электрических машин» при подготовке студентов по специальности 180100 – электромеханика.

Результаты исследований и основное содержание работы отражены в следующих публикациях:

1. Жарикова Т.В., Муравлева О.О. Имитационное моделирование показателей качества асинхронных двигателей // Четвертая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ». Сб. статей. – Томск: Изд-во ТПУ, 1998. – с.181-182.
2. Жарикова Т.В., Муравлева О.О. Применение ПЭВМ для моделирования температуры обмотки асинхронных двигателей // СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ: труды пятой международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 1999. – с.284-286.
3. Оценка значений показателей качества асинхронных двигателей по результатам моделирования и экспериментов / Жарикова Т.В., Муравлева О.О.; Том. политехн. ун-т.- Томск, 1999.- 13с.: ил.- Рус.- Деп. в ВИНТИ 30.12.99. №3976-B99
4. Математическое моделирование показателей качества асинхронных двигателей / Жарикова Т.В., Муравлева О.О.; Том. политехн. ун-т.- Томск, 2000.- 13с.: ил.- Библиогр.: 6назв.- Рус.- Деп. в ВИНТИ 19.04.00. №1075-B00.
5. Влияние повышения точности изготовления на рассеивание показателей качества и конкурентоспособность асинхронных двигателей / Муравлев О.П., Муравлева О.О., Жарикова Т.В.; Том. политехн. ун-т.- Томск, 2000.- 15с.: ил.- Библиогр.: 4назв.- Рус.- Деп. в ВИНТИ 29.09.00. №2531-B00.
6. Жарикова Т.В., Муравлева О.О. Оценка значений показателей качества асинхронных двигателей // СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ: труды шестой международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2000. – с.269-270.

7. Жарикова Т.В., Муравлева О.О. Анализ показателей качества при изготовлении асинхронных двигателей // В сб.: Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика. Сборник научных трудов. Выпуск 6. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Красноярск, 2000. – с.353-355.
8. Жарикова Т.В., Муравлева О.О. Моделирование и анализ показателей качества при проектировании и изготовлении асинхронных двигателей // Решетневские чтения: Тезисы докладов IV Всеросс. Научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов (10-12 ноября 2000, Красноярск). – Красноярск САА, 2000. – с.33-34.
9. Муравлев О.П., Муравлева О.О., Жарикова Т.В. Проектирование асинхронных двигателей с учетом технологических погрешностей // В сб. Вестник Уральского государственного технологического университета – УПИ «Электромеханика и управляемые электромеханические системы», Екатеринбург, 2000. – с.400-405.
10. Жарикова Т.В., Муравлева О.О. Оценка рассеивания показателей качества асинхронных двигателей по результатам моделирования // СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ: труды седьмой международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. - Томск: Изд. ТПУ, 2001. – Т.2. – с.74-76.
11. Muravlyov O., Muravlyova O., Zharikova T. Application of accuracy theory in manufacturing induction motors \ In Proceedings The seventh International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates an Young Scientist “Modern Techniques and Technology (MTT’2001)” Tomsk, TPU Press, 2001. – p.93-95.
12. Жарикова Т.В., Муравлева О.О. Использование метода планирования эксперимента для оптимизации асинхронных двигателей // Электрические преобразователи энергии: Материалы Международной науч.-техн. конф. 6-7 сентября 2001 г. Томск: ТПУ, 2001 г. – с.116-117.
13. Жарикова Т.В., Муравлева О.О., Глухов Д.М. Унификация сердечников статоров для различных габаритов асинхронных двигателей // СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ: труды восьмой международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. - Томск: Изд. ТПУ, 2002. – Т.2. – с.15-17.
14. Zharikova T., Muravlyova O., Glykhov D. The design of induction motor different dimensions at uniform stator core cross section \ In Proceedings The 8 International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates an Young Scientist “Modern Techniques and Technology (MTT’2002)” Tomsk, TPU Press, 2002.
15. Влияние точности изготовления на массогабаритные показатели асинхронных двигателей / Жарикова Т.В., Муравлева О.О.; Томский политехн. ун-т, Томск, 2002.- 15с.- Деп. В ВИНТИ 15.07.02 №1341-В02.